

Дослідження процесів нарощування МК шару природно необхідно робити по закінченні теплового розширення системи, уводячи РВС у мастильне середовище саме після цього.

Авторами проведена велика кількість експериментів з використанням даного пристрою, у тому числі й експерименти по нарощуванню МК шару за допомогою РВС. Зафіксовані при цьому величини зносу перевірялися методом штучних баз і ваговим методом, а значення наросту на зразках перевірялися за допомогою профілометра, інтерферометра Лінника, а також мікрометрируванням.

Отримані результати дозволяють говорити про розглянутий пристрій, як про надійний і точний інструмент дослідження динаміки і величини зміни геометрії зразків при випробуваннях на машині тертя 2070 СМТ-1.

Список літератури: 1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с. 2. Миронов Е.А., Баздеркин В.А., Стандиченко Н.Г. Методы измерения величины износа и температуры поверхности образцов при испытании материалов на износ. В сб.: Проблемы трения и изнашивания. – Киев: Техника, 1982. – Вып. № 22. – С.49-52.

Поступила до редколегії 26.06.2003

УДК 539.3:621.039.623

Б.Ф.ЗАЙЦЕВ, канд.техн.наук;

А.В.АСАЁНОК, ИПМаш НАН України

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ВИНТОВОЙ ОБМОТКЕ ТОРОИДАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Розглядається напружений стан обмотки тороїдальної магнітної системи внаслідок прогріву. Застосовано тривимірний МСЕ зі спеціального системою завдання геометрії. Дано аналіз результатів і зіставлення з іншими рішеннями.

State of stress of the toroidal magnetic system winding of a result of the warm-up is considered. The 3D FEM with special system of the representation of geometry is used. Analysis of results and comparison with other solution are presented.

Одним из основных направлений при создании электрофизической аппаратуры является повышение уровней напряженности магнитных полей различных электромагнитных систем. В частности, в установках по удержанию плазмы с замкнутыми магнитными ловушками типа токамак или торсатрон наиболее напряженной является тороидальная магнитная система. Повышение параметров тороидального магнитного поля сопровождается возрастанием уровня электродина-

мических сил и, как следствие, механической напряженности конструкции тороидальной системы. Возможности повышения прочности материалов для токонесущих элементов, а также способы конструктивных решений соленоидов для снижения напряженности ограничены. В связи с этим предложены методы создания разгруженных и "бессиловых" магнитных систем [1–3]. В основе методов лежит идея управления электродинамическими усилиями для их самоуравновешивания и создания напряженного состояния, близкого к всестороннему сжатию. Технически это осуществляется введением компенсирующих магнитных полей, реализуемых различными способами.

Уравновешенность электродинамических сил, которые имеют объемное распределение (при проникновении магнитного поля в соленоид), снимает или существенно понижает уровень напряжений, обусловленный деформацией соленоида как стержневой системы. При этом остается открытым вопрос об уровне напряженного состояния, вызванного эффектами обжатия и, что особенно важно, влиянием температурного поля. Влияние температуры особенно актуально для многослойных соленоидов металлоизоляционной структуры.

В данной работе на примере "бессиловой" обмотки тороидального поля установки "Ураган-3" рассмотрен вопрос о ее напряженном состоянии при равномерном прогреве (до температуры T_0). Винтовая обмотка установки "Ураган-3" является трехзаходной и состоит из трех полюсов, представляющих собой тороидальные замкнутые спирали. Модель одного из полюсов представлена на рис. 1, а его сечение – на рис. 2. Проводящая часть полюса имеет многовитковую достаточно регулярную структуру в виде медно-изоляционного компаунда и помещена в стальной тонкостенный корпус.

Проблемным является вопрос о построении рациональной расчетной модели обмотки. Так как обмотка сконструирована как "бессиловая", то одномерные модели теории стержневых систем не пригодны. Двумерные модели позволяют в деталях, с учетом реальной структуры рассмотреть НДС в сечении полюса [4, 5]. Однако эффекты деформирования из плоскости сечения заглубляются, причем оценить вносимую погрешность непросто. Таким образом, наиболее последовательным, лишенным грубых оценочных предположений, является подход на основе трехмерного моделирования. Одни из немногих попыток решения задачи в трехмерной постановке даны в [6, 7].

Отличительной особенностью винтовых обмоток является специфичность их геометрии. Применение существующих программных комплексов, как отечественных, так и иностранных для расчетов НДС таких обмоток, неэффективно без их доработки. Примером эффективного применения численных методов для специального класса объектов, включая и рассматриваемую обмотку, являются работы [8–10]. В данной статье способы полуаналитического описания геометрии, аналогичные [8], использованы в программном комплексе AVA [11, 12].

Навивка спиральной обмотки установки "Ураган-3" осуществляется на тороидальную поверхность по заданному закону, устанавливающему связь

между тороидальными координатами φ, θ :

$$m\varphi = -\theta + \alpha \sin \theta + \beta \sin 2\theta, \quad (1)$$

где φ – угол поворота большого радиуса тора R_0 ; θ – угол поворота малого радиуса тора α ; m – число оборотов обмотки вокруг круговой оси тора; α, β – коэффициенты модуляции.

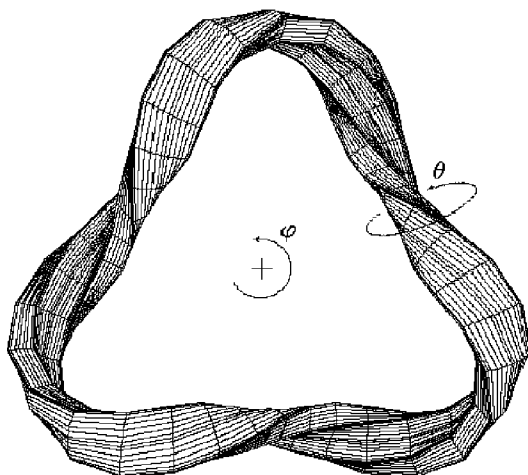


Рис. 1. Модель полюса обмотки

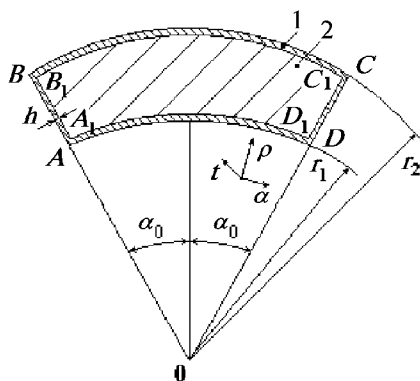


Рис. 2. Схема сечения винтовой обмотки:
1 – стальная оболочка; 2 – медно-изоляционный компаунд

Математически геометрию обмотки можно описать, введя опорную кривую [8] согласно (1), и связав с ней систему ортов $\bar{t}, \bar{n}, \bar{b}$, где \bar{t} – орт касательной опорной кривой, \bar{n} – орт, совпадающий с направлением малого радиуса тора, $\bar{b} = [\bar{t}, \bar{n}]$ – орт, дополняющий правую тройку векторов. Сечение

обмотки, связанное неизменно с ортами \bar{n} , \bar{b} , при движении по опорной кривой описывает тело, занимаемое обмоткой.

Сечение полюса представляет собой круговой сектор и для удобства, помимо декартовых и тороидальных, введены также криволинейные координаты p , α , t (см. рис.2), причем в плоскости сечения координаты p , α являются полярными. Точка сечения $p = r_1$, $\alpha = 0$ принадлежит опорной кривой и для этой точки орты \bar{n} , \bar{b} совпадают с направлением p и α .

Уравнение опорной кривой имеет вид

$$x_0 = a \sin \theta, \quad y_0 = (R_0 + a \cos \theta) \cdot \cos \varphi, \quad z_0 = (R_0 + r \cos \theta) \cdot \sin \varphi, \quad (2)$$

а орт касательной к ней \bar{t} определяется формулами

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \bar{t}_1 / |t_1|, \quad \bar{t}_1 \{x'_\varphi, y'_\varphi, z'_\varphi\}; \quad x'_\varphi = a\theta'_\varphi \cos \theta; \\ y'_\varphi &= -(R_0 + a \cos \theta) \cdot \sin \varphi - a \cdot \theta'_\varphi \sin \theta \cdot \cos \varphi; \\ z'_\varphi &= (R_0 + a \cos \theta) \cdot \cos \varphi - a \cdot \theta'_\varphi \sin \theta \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Величина θ'_φ определяется по обратной функции $\varphi = \varphi(\theta)$ (1):

$$\theta'_\varphi = (\varphi'_\theta)^{-1}; \quad \varphi'_\theta = m^{-1}(-1 + \alpha \cos \theta + 2\beta \cos 2\theta),$$

а вычисление $\theta = \theta(\varphi)$ выполняется по методу Ньютона

$$\theta_{k+1} = \theta_k - \frac{f(\theta_k)}{f'(\theta_k)}; \quad \pi^{-1} \cdot |\theta_{k+1} - \theta_k| \leq \varepsilon \quad (\varepsilon = 10^{-6} \div 10^{-3}), \quad (4)$$

где $f(\theta) = -m\varphi - \theta + a \cdot \sin \theta + \beta \sin 2\theta$; $f'(\theta) = -1 + a \cdot \cos \theta + 2\beta \cos 2\theta$.

Орт \bar{n} имеет компоненты $n_x = \sin \theta$; $n_y = \cos \theta \cdot \cos \varphi$; $n_z = \cos \theta \cdot \sin \varphi$.

Задание геометрии обмотки сводится к заданию сечения в координатах s , q , соответствующих ортам \bar{n} , \bar{b} , или в полярных координатах p , α и параметров опорной кривой. При использовании МКЭ вводится дискретная информация: сетка Δ_{sq} , описывающая сечение, и сетка Δ_φ , определяющая положение сечений вдоль опорной кривой.

Декартовы координаты точки определяются формулами

$$x = x_0 + s \cdot n_x + q \cdot b_x; \quad y = y_0 + s \cdot n_y + q \cdot b_y; \quad z = z_0 + s \cdot n_z + q \cdot b_z. \quad (5)$$

Таким образом, специфическая геометрия винтовой обмотки может быть эффективно описана полуаналитически согласно формулам (1–5).

Задача о напряженном состоянии в винтовой обмотке при прогреве решается в постановке трехмерной задачи термоупругости МКЭ при помощи программного комплекса AVA [11, 12] с учетом модификации по описанию геометрии.

В комплексе AVA применяется топологически регулярная система дискретизации на восьмиузловые полилинейные изопараметрические конечные элементы. При больших уровнях дискретизации (свыше 10^5 переменных) применяется многосеточный вариант МКЭ в полуитерационной форме [13]. Для кольцевых объектов, к которым, в частности, относится винтовая обмотка, введена процедура замыкания, что приводит к окаймлению матрицы жесткости конструкции.

Медно-изоляционный компаунд для простоты заменяется изотропной средой с эффективными тепломеханическими характеристиками, определяемыми со-

гласно методам механики композитов [14]. По значениям макронапряжений и макродеформаций в компаунде, определяемым из решения, могут быть вычислены истинные значения напряжений в составляющих элементах композита – медных шинах и изоляции. Примеры использования таких процедур приведены в [4, 15]. Можно отметить, что возможности комплекса позволяют рассмотреть дискретное строение компаунда (до 60 медных шин), что не всегда оправдано и затрудняет из-за большой размерности задачи варианты исследования.

К обмотке не приложены внешние силы, поэтому достаточно произвольно закрепить ее в пространстве, убрав возможность смещения как твердого целого.

Параметры обмотки, с которыми выполнялись численные исследования, имели значения: $m = 3$; $\alpha = 0,2$; $\beta = -0,0105$; $R_0 = 100$ см; $a = r_1 = 20,3$ см; $r_2 = 33,7$ см; $\alpha_0 = 30^\circ$; $h = 0,2$ см; $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\nu_1 = 0,28$; $\alpha_1 = 1,17 \cdot 10^{-5}$ K $^{-1}$; $E_2 = 1,25 \cdot 10^5$ МПа; $\nu_2 = 0,35$; $\alpha_2 = 1,65 \cdot 10^{-5}$ K $^{-1}$.

Конечноэлементная сетка Δ_{sq} для компаунда выбрана неравномерной и соответственно по координатам ρ , α составляла 9×16 элементов, а по толщине стальной оболочки назначено по два элемента. Сетка Δ_ϕ принималась равномерной с 36-ю элементами. Общее число узловых параметров составило 31752.

Результаты численных исследований напряженного состояния обмотки представлены на рис. 3, 4, где даны компоненты нормальных напряжений в системе координат ρ , α , t , наиболее удобной для контроля точности и анализа решения. Напряжения приведены на развертках контуров $ABCD$ и $A_1B_1C_1D_1A_1$ (см. рис. 2), соответственно относящихся к стальной оболочке и медно-изоляционному компаунду. При этом на соответствующих участках контура представлены характерные (преобладающие) напряжения.

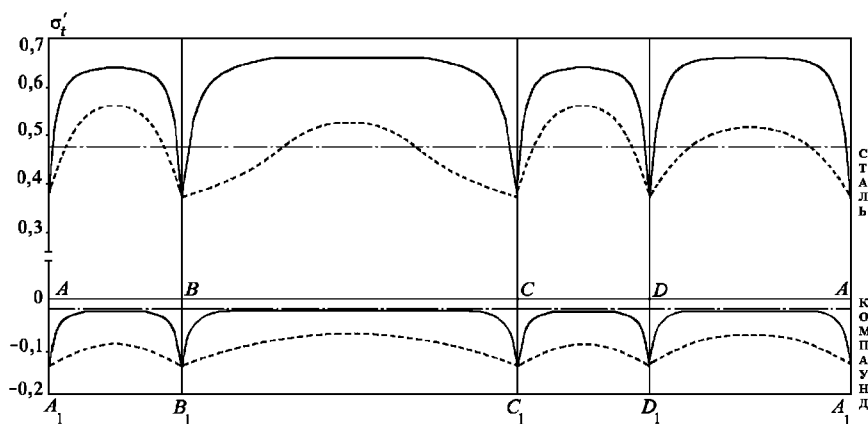


Рис. 3. Напряжение $\sigma'_t = \sigma_t / E_2 \alpha_2 T_0$ на развертках контуров:

– расчет по данной методике; – – результаты [7]; – · – оценочное решение

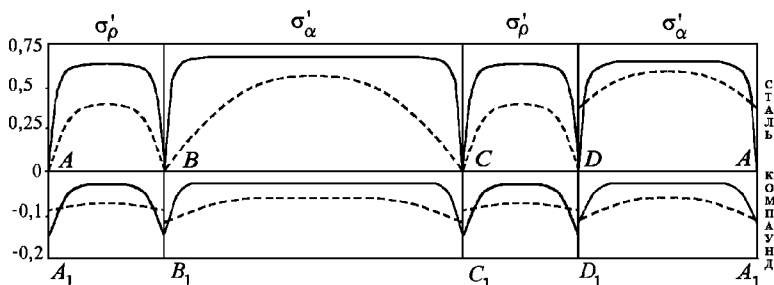


Рис. 4. Напряжения $\sigma'_\rho = \sigma_\rho / E_2 \alpha_2 T_0$, $\sigma'_\alpha = \sigma_\alpha / E_2 \alpha_2 T_0$ на развертках контуров: расчет по данной методике; -- результаты [7]

Общий анализ напряженного состояния показывает, что вдоль обмотки напряжения меняются незначительно, т.е. при постоянном температурном прогреве задача двумерная и возможно применение двумерных схем расчета. Для сравнения представлены результаты расчетов [7] (рис. 3, 4) и оценочного решения (рис. 3). Оценочное решение получено на основе одномерной модели продольной деформации биметаллического стержня при постоянной температуре. Результаты работы [7] получены МКЭ с применением 20 узловых изопараметрических элементов, но с весьма разреженной сеткой, вследствие чего следует считать эти результаты относительно неточными. Согласно расчетной модели [7] рассматривался периодический фрагмент ($0 \leq \varphi \leq 120^\circ$) с постановкой условий периодичности, которые аналогичны условию замыкания в принятой модели.

Сопоставление результатов данной работы и [7] показывает качественное, а по максимальным значениям и количественное согласование. Отмечается резко выраженная неравномерность распределения продольных (σ_l) напряжений по угловым областям сечения, где существенна двухмерность напряженного состояния. Намного меньшая дискретизация сечения в работе [7] не позволяет в полной мере выявить неравномерность распределения, поэтому эпюры напряжений носят сглаженный характер.

Стальная оболочка полюса обмотки растягивается по всем направлениям (ρ , α , l) компаундом, который расширяется сильнее, причем максимальные значения компонент напряжений σ'_l , σ'_ρ , σ'_α лежат в пределах $0,6 \div 0,75$. Напряжения по толщине весьма тонкой стальной оболочки распределены почти равномерно. Т.е., несмотря на существенное искривление (из-за раздутия) изгибные напряжения незначительны по сравнению с мембранными. Компаунд находится, в основном, в сжатом состоянии из-за стеснения деформаций со стороны стальной оболочки, а напряжения в нем существенно ниже, что определяется соотношением тепломеханических характеристик и объемов элементов из стали и компаунда.

Можно отметить незначительные ($\sigma_\rho > 0$) растягивающие напряжения σ_ρ на границе между стальной оболочкой и компаундом по внутреннему радиу-

су, что в зависимости от показателей адгезии материалов, в принципе, может приводить к расслоению структуры. В исходной модели полюса обмотки предполагается сплошность по границам раздела разнородных материалов. Постановка задачи с учетом расслоения структуры обмотки дана в [6].

Учитывая реально достигаемые значения температуры $T_0 \approx 90^\circ\text{C}$ вследствие перегрева проводников [2], напряжения в стальной оболочке могут достигать значительных величин (130 – 140 МПа), что следует иметь ввиду при выборе марки стали оболочки.

В заключение отметим, что при необходимости могут быть учтены неравномерность температурного поля, анизотропия и неоднородность композита, или, как указывалось, вообще дискретность его структуры.

Таким образом, в работе построено специализированное математическое обеспечение расчетов НДС винтовых обмоток тороидальных магнитных систем в трехмерной постановке. Полуаналитические алгоритмы формирования геометрии обмоток и ее нагружения обеспечивают эффективность построения конечноэлементных моделей. На примере обмотки торсатрона композитной структуры дан анализ термонапряжений при равномерном прогреве. Показано, что трехмерность задачи при данном виде нагружения вдоль обмотки проявляется незначительно, но распределение напряжений по сечению двумерное.

Сопоставление с результатами, полученными другими методами, подтверждает достоверность решения задачи. Абсолютные значения основных компонент напряжений, по которым оценивается прочность, могут достигать в режиме прогрева значительных величин, что ограничивает достижение предельно допустимых значений магнитного поля тороидальной системы.

Список литературы: 1. "Бессилловые" тороидальные магнитные системы / Быков В.Е., Георгиевский А.В., Корякко В.И. и др. // Харьков, 1976. – 51 с. (Препринт /ХФТИ; 76–39). 2. Характерные особенности силового нагружения и напряженного состояния винтовых обмоток установок торсатронного типа / А.В.Георгиевский, В.И.Корякко, М.Д.Рарог и др. // Вопр. атомной науки и техн. Термоядерный синтез. – 1984. – Вып. 2 (15). – С. 44-53. 3. Разгруженная магнитная система для токамака со сверхсильным магнитным полем / Ю.Л.Бормот, М.Ш.Бурдиашвили, Д.А.Войтенко и др. // Вопр. атомной науки и техн. Термоядерный синтез. – 1984. – Вып. 4 (17). – С. 10-19. 4. Применение двумерных схем метода конечных элементов к расчету катушек тороидального магнитного поля токамака / А.Н.Подгорный, П.П.Гонтаровский, Б.Ф.Зайцев и др. // Пробл. прочности. – 1982. – № 7. – С. 45-49. 5. Зайцев Б.Ф., Корякко В.И. Двумерный прочностной анализ многосвитковой "бессилловой" обмотки торсатрона // Докл. Третьей Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов: В 4-х тт. – М.: ЦНИИатоминформ, 1984. – Т. 2. – С. 200-205. 6. Корнилов Г.Л., Нарыжный А.Г. О напряженно-деформированном состоянии катушек магнитных систем с учетом разрушения электроизоляции // Вопр. механики деформируемого твердого тела. – 1979. – № 1. – С. 27-30. 7. Корниль Т.Л. Решение трехмерной задачи термоупругости для тел, ориентированных вдоль произвольной пространственной кривой // Дис. канд.техн.наук: 01.02.06. – Харьков. – 1992. –133 с. 8. Зайцев Б.Ф., Корниль Т.Л. Решение трехмерной задачи термоупругости для протяженных тел с учетом периодичности. – Харьков, 1991. – 62 с. (Препринт / АН УССР. Ин-т пробл. машиностроения; № 348). 9. Подгорный А.Н., Зайцев Б.Ф., Корниль Т.Л. О решении трехмерной термоупругой периодической задачи для протяженных тел // Прикл. механика. – 1995. – № 10. – С. 40-45. 10. Зайцев Б.Ф., Корниль Т.Л. Применение трехмерных схем МКЭ для расчета напряженно-деформированного состояния плоских ка-

тушек тороидального магнитного поля токамака // Пробл. прочности. – 1989. – № 12. – С. 88-92. **11.** Асаенко А.В., Зайцев Б.Ф. Трехмерное моделирование деформаций и вопросы прочности объемных элементов поворотнлопастных гидротурбин // Вестник науки и техники. – 1997. – Вып. 1. – С. 10-18. **12.** Асаенко А.В., Зайцев Б.Ф., Шульженко Н.Г. Расчет колебаний циклически симметричных конструкций трехмерными конечными элементами // Пробл. машиностроения. – 2001. – Т. 3, № 3-4. – С. 22-28. **13.** Булгаков В.Е., Золотов А. Б., Белый М.В. Полуитерационный метод решения пространственных краевых задач расчета сооружений // Строит. механика и расчет сооружений. – 1985. – № 6. – С. 38-40. **14.** Ван Фо Фы Г.А. Конструкции из армированных пластмасс. – Киев: Техника. – 1971. – 220 с. **15.** Расчет на прочность биттеровской катушки тороидального магнитного поля установки типа токамак / А.Н.Подгорный, А.Г.Киров, Б.Ф.Зайцев и др. // Харьков, 1986. – 43 с. (Препринт /АН УССР. Ин-т пробл. машиностроения: № 235).

Поступила в редколлегию 03.04.2003

УДК 62.254

В.А.ЖОВДАК, д-р техн. наук; **С.П.ИГЛИН**, канд. техн. наук;
Л.М.СМИРНОВА; **В.А.СОЛОШЕНКО**, канд. техн. наук

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОПАТКИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ТУРБОКОМПРЕССОРА ПО КРИТЕРИЮ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ

Розв'язана задача оптимізації лопатки швидкісного колеса турбокомпресора двигуна внутрішнього згорання. Цільовою функцією є перша частота власних коливань, змінні параметри – товщини у вузлах скінченноелементної сітки. Використовується двовимірна модель лопатки з трикутним скінченним елементом. Застосовується модифікація квазіньютонівського методу оптимізації з BFGS-формулою, кубічною апроксимацією при одновимірному пошуку та ковзанням уздовж обмежень. Наведені числові результати.

The optimization problem for blade of the turbocompressor for internal combustion engine boosting turbine wheel is solved. The objective function is the first natural frequency, variable parameters are blade thicknesses in FEM-grid nodes. 2D shell model of blade with triangle finite element is used. We use the modification of the quazi-Newton optimization method with BFGS-formula, cube approximation in the 1D search and sliding along boundless. Numerical results are presented.

1. Постановка задачи

Малоразмерные рабочие колеса турбин для систем наддува дизелей работают, как правило, в широком диапазоне рабочих режимов, когда высшие гармоники газодинамического возбуждения могут резонировать с нижней частью спектра рабочих колес. В таких условиях одним из общих принимаемых критериев динамической оптимизации является повышение собственной частоты изолированной лопатки, что позволяет поднять нижние собственные частоты всего колеса радиально-осевой турбины полуоткрытого типа. Несмотря на то, что на поле толщин лопатки накладываются различные ограни-